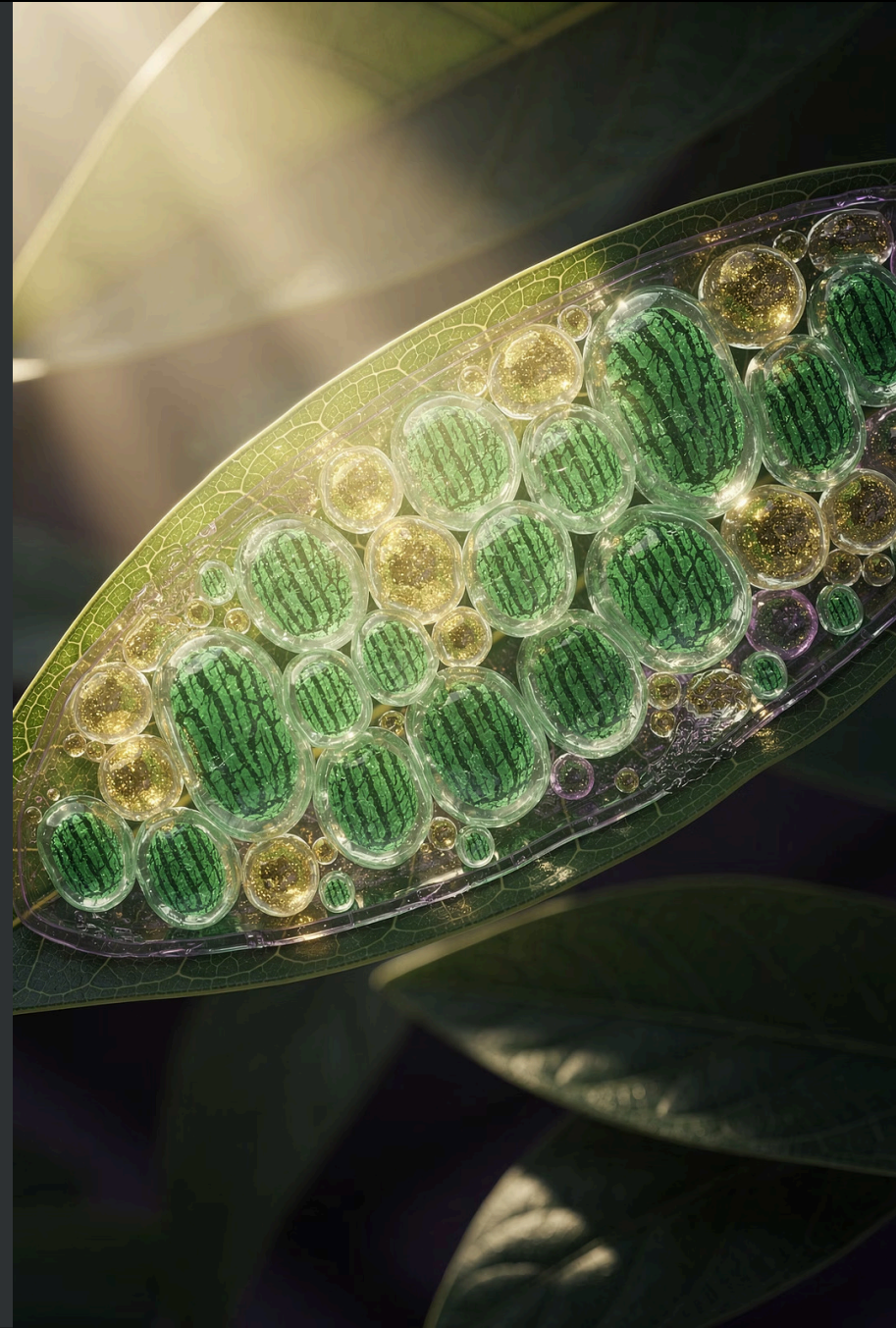
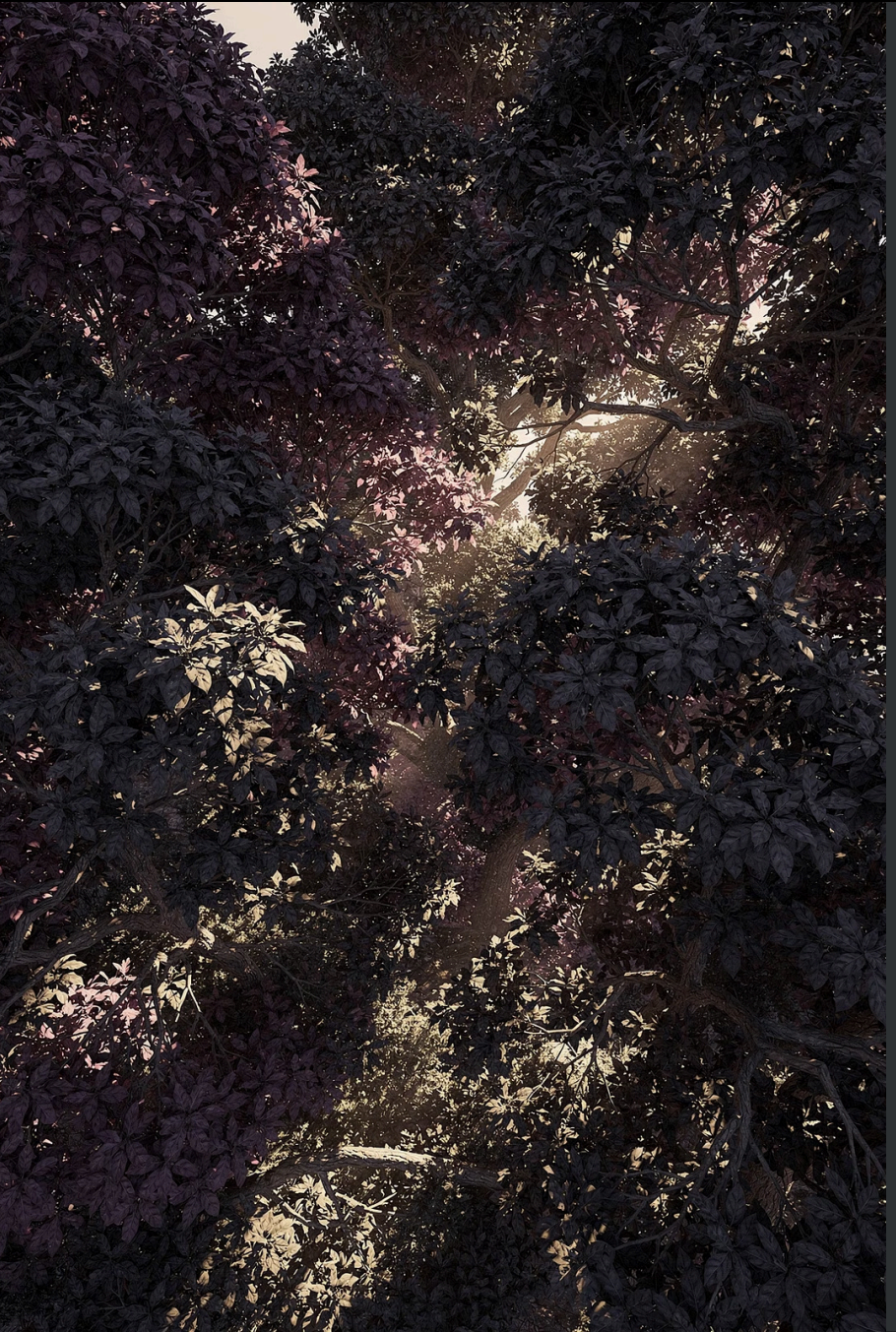
Fotosentez: Işık Aracılığıyla İnorganik Maddeden Organik Hayatın İnşa Edilmesi

Ders Sunumu

Teradigma





Fotosentez Nedir?

Güneş ışığının enerjisi, biyolojik sistemlerin doğrudan kullanamayacağı bir formdadır. Fotosentez; bu ışık enerjisinin, biyolojik sistemlerin kullanabileceği kararlı kimyasal enerjiye dönüştürüldüğü merkezi biyokimyasal hadisedir.

Kim Gerçekleştirir?

Bitkiler, algler ve bazı bakteri türleri tarafından gerçekleştirilir

Biyokütle

Yeryüzündeki biyokütlenin neredeyse tamamının temelini oluşturur

Küresel Rol

Atmosferdeki oksijen seviyesinin idamesi ve küresel karbon döngüsünün düzenlenmesinde kritik rol oynar

Temel Dönüşüm

Fotosentez, en genel haliyle şu denklemle özetlenir:

$6CO_2 + 6H_2O + \text{Işık Enerjisi} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$

1

Yükseltgenme

Su molekülleri yükseltgenir (elektron kaybeder)

2

İndirgeme

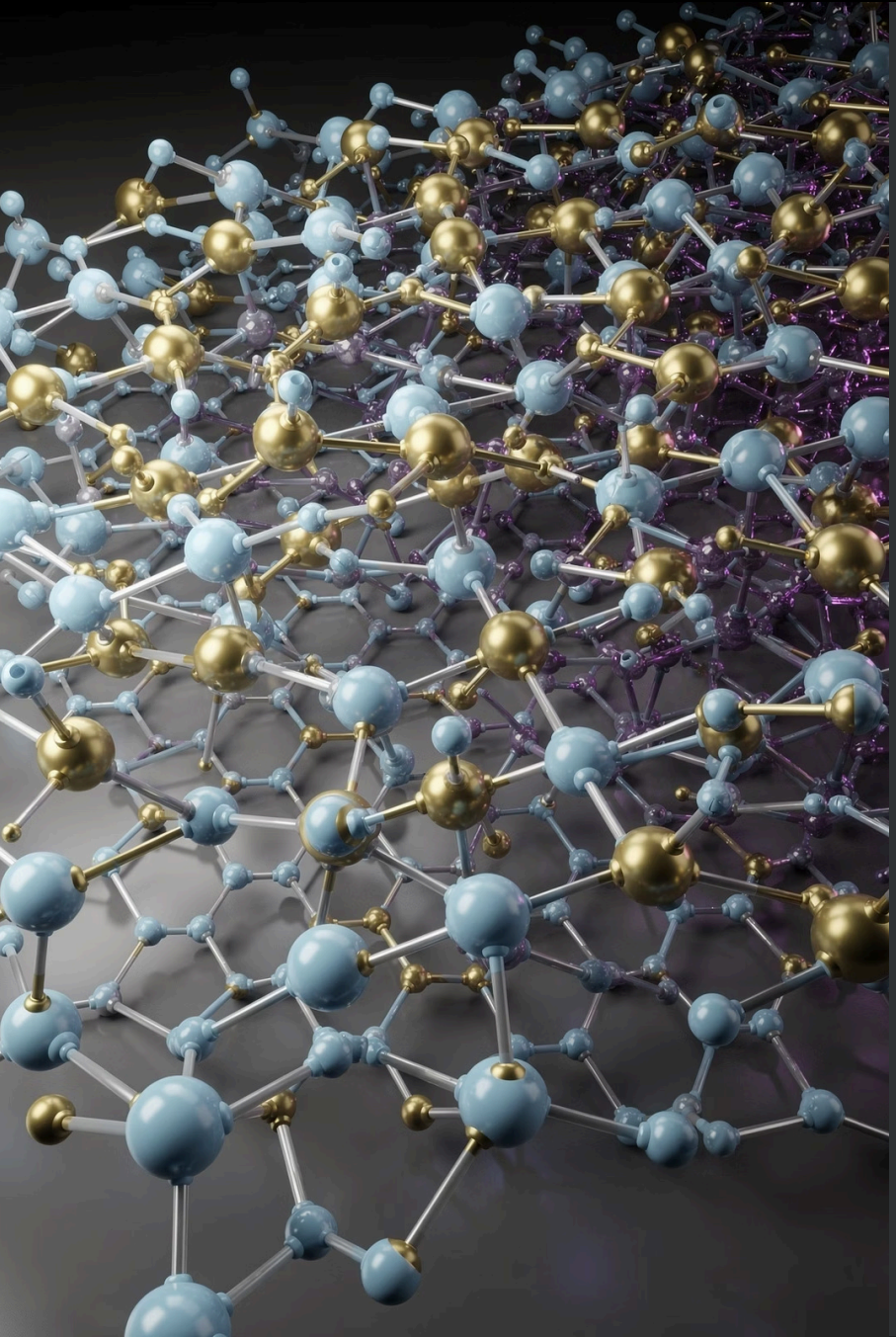
Bu elektronlar CO_2 moleküllerinin indirgenmesinde (elektron kazanmasında) kullanılır

3

Sentez

Böylece karbonhidratlar sentezlenir

> **Tefekkür:** Havadaki görünmez bir gaz, cansız bir sıvı ve ışık — bu üç hammaddeden yeryüzündeki hayatın yakıtı inşa edilmektedir. Peki bu dönüşüm nasıl mümkün olmaktadır?

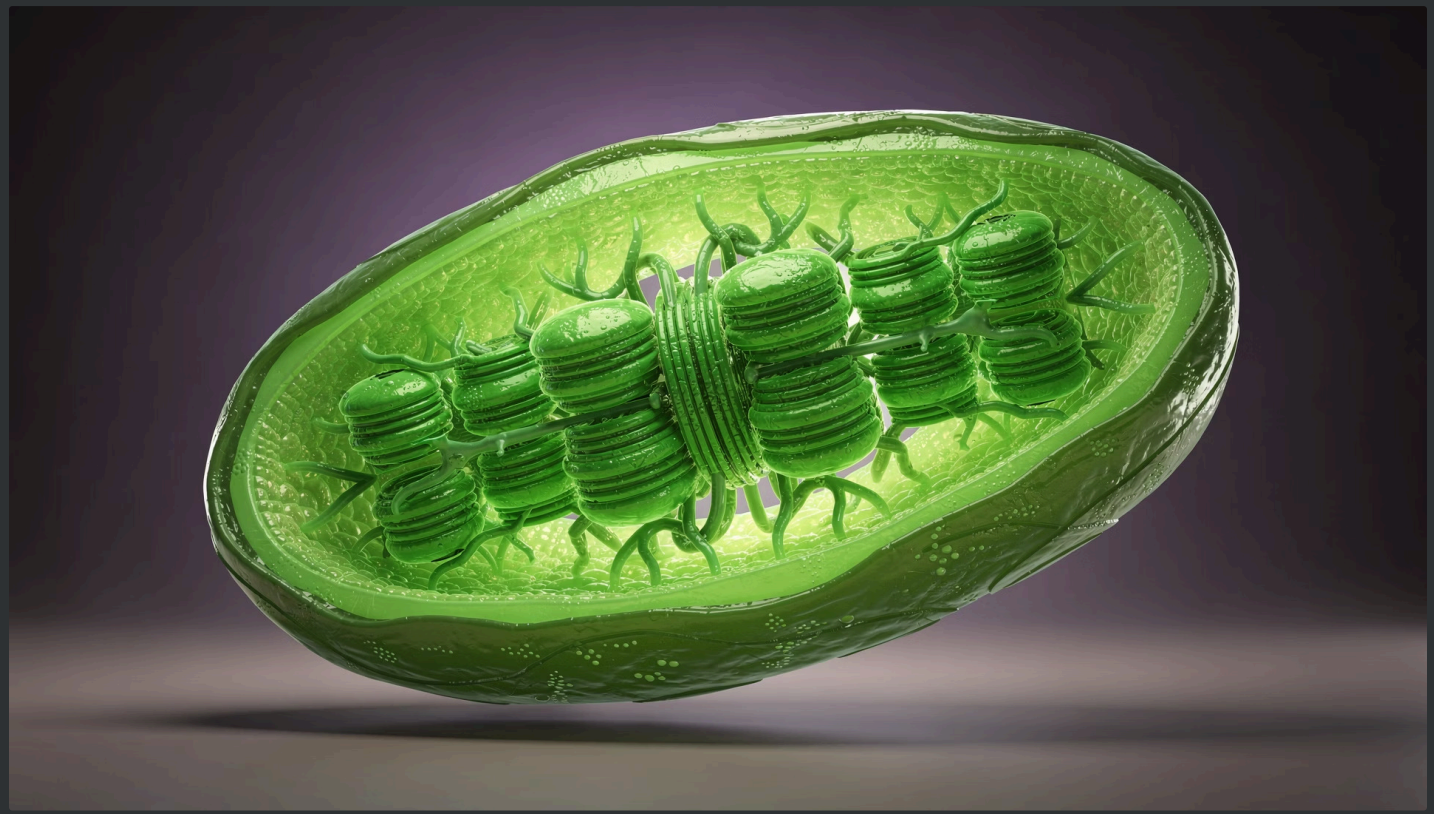


Yapım mı, Yıkım mı? Anabolik Bir Süreç

Fotosentez, düşük enerjili ve kararlı inorganik moleküllerin, kimyasal bağlarında yüksek miktarda enerji depolayan karmaşık organik moleküllere dönüştürüldüğü **anabolik** (yapım) bir süreçtir.

Basit bileşenlerden karmaşık bir yapının inşa edilmesi; o yapının enerji için parçalanmasından niteliksel olarak farklı ve daha karmaşık bir mekanizmalar bütünü gerektirir. Bu asimetri, biyolojik sistemlerde yapım ve yıkım süreçlerinin farklı, özelleşmiş ve geri döndürülemez yollarla düzenlendiğini gösteren temel bir ilkeye işaret eder.

Sahne: Kloroplast



Fotosentez, bitki ve alg hücrelerinde **kloroplast** adı verilen özelleşmiş bir organel içinde meydana gelir.

Karmaşık Yapı

Kendine ait DNA ve ribozomlar içeren karmaşık bir yapıdır

Sayı

Tipik bir bitki hücresi 10 ila 100 arasında kloroplast barındırabilir

Mimari

Fotosentezin farklı aşamalarının en yüksek verimlilikle yürütülmesini sağlayacak şekilde tertip edilmiştir

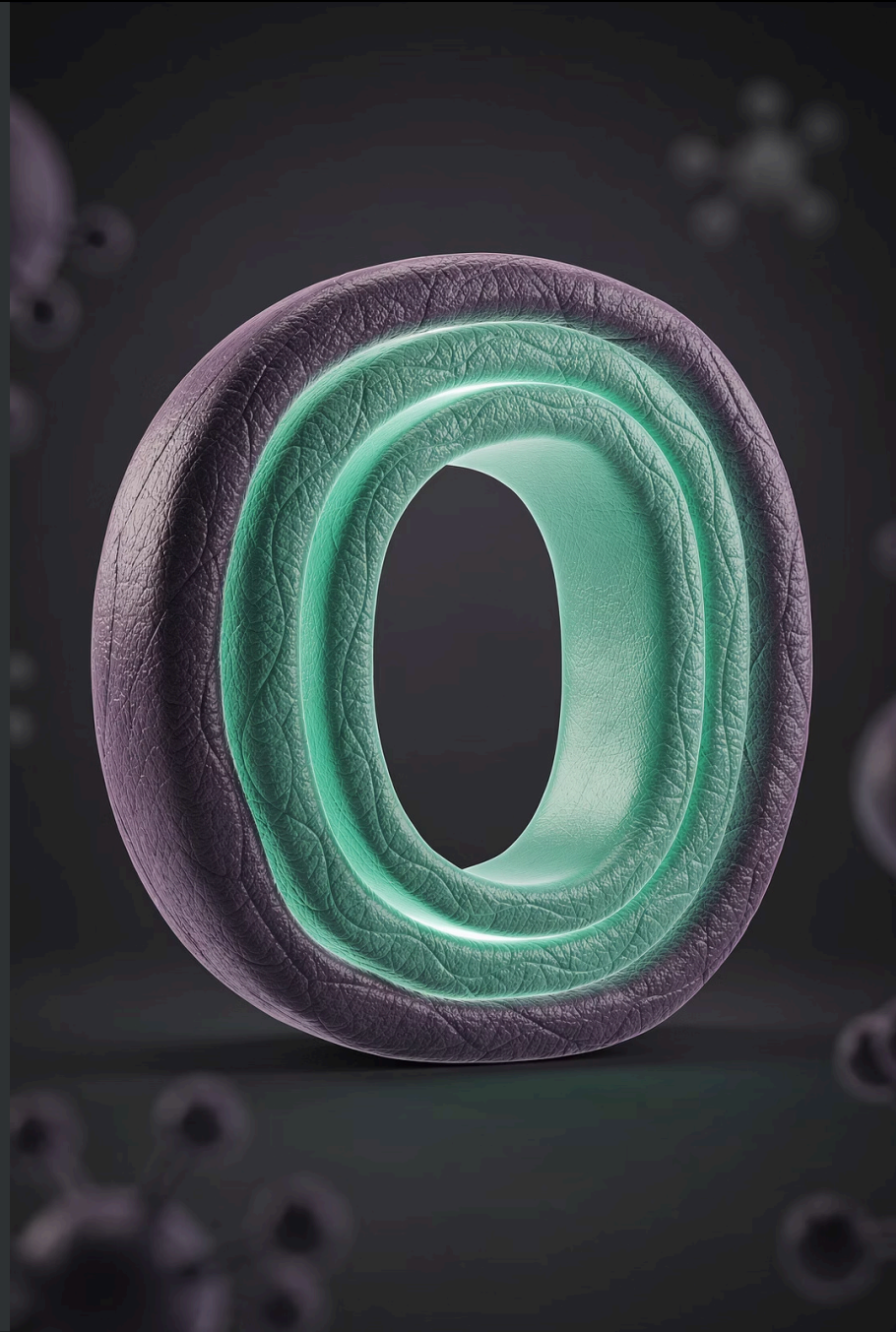
Kloroplast Mimarisi — Dış Yapı

Kloroplast Zarfı

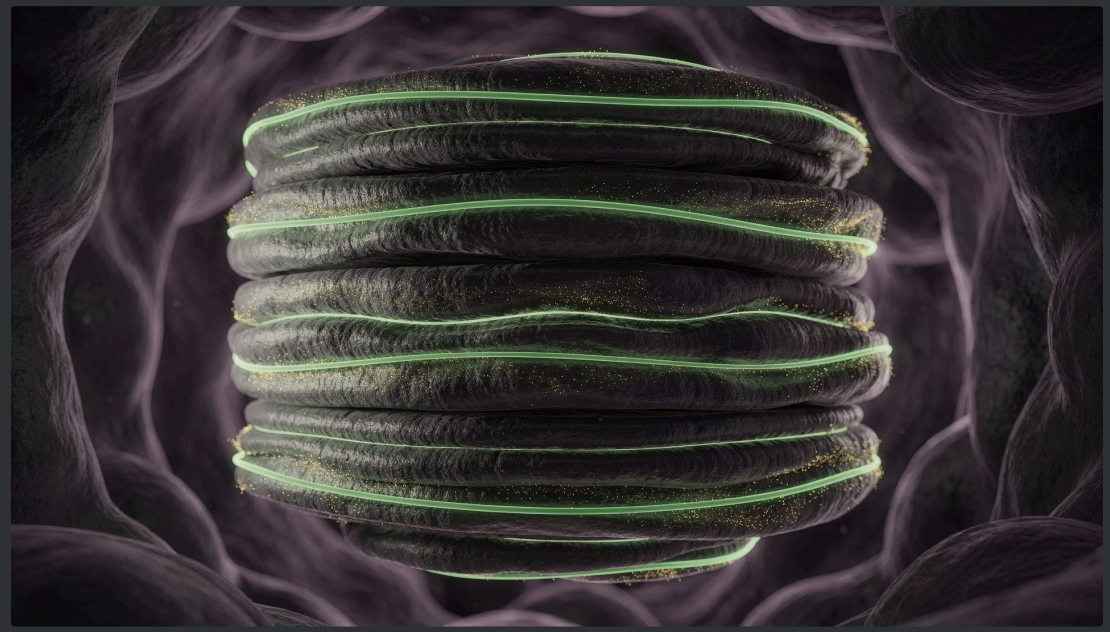
Organeli çevreleyen, dış ve iç zardan oluşan çift katmanlı yapıdır; organel içi ile sitoplazma arasındaki madde alışverişini kontrol eder

Stroma

İç zarın çevrelediği, jel benzeri sıvı dolu kısımdır; Calvin döngüsü enzimlerini, kloroplast DNA'sını, ribozomları ve nişasta granüllerini içerir



Kloroplast Mimarisi — Tilakoid Sistemi



Tilakoid Membran Sistemi

Stroma içinde yer alan, birbirine bağlı yassılaşmış keseciklerden oluşan zar sistemidir; ışığa bağımlı reaksiyonlar burada gerçekleşir

Grana

Tilakoidlerin madeni para desteleri gibi üst üste yığılmasıyla oluşur; sınırlı hacimde ışık yakalama yüzey alanını muazzam ölçüde artırır

Lümen

Her tilakoid keseciğin iç boşluğudur; protonların (H+) biriktirildiği rezervuar görevi görür

İki Aşama, İki Mekan

Kloroplastın bölümlendirilmiş yapısı, hayati bir işlevsel ayrıma olanak tanır:

Tilakoid Membranlarda

Işığa bağımlı reaksiyonlar gerçekleşir; lümen oldukça asidik bir hale gelir (pH ≈ 4)

Stromada

Calvin döngüsü gerçekleşir; bu reaksiyonlar için uygun alkali ortam sağlanmış olur

Bu mekânsal ayrım, birbiriyle kimyasal olarak uyumsuz reaksiyonların birbirine müdahale etmesini önleyerek tüm sürecin verimliliğini en üst düzeye çıkaran hikmetli bir düzenlemedir.

Işığa Bağımlı Reaksiyonlar: Genel Amaç

Bu ilk aşama tilakoid zarlar üzerinde gerçekleşir.

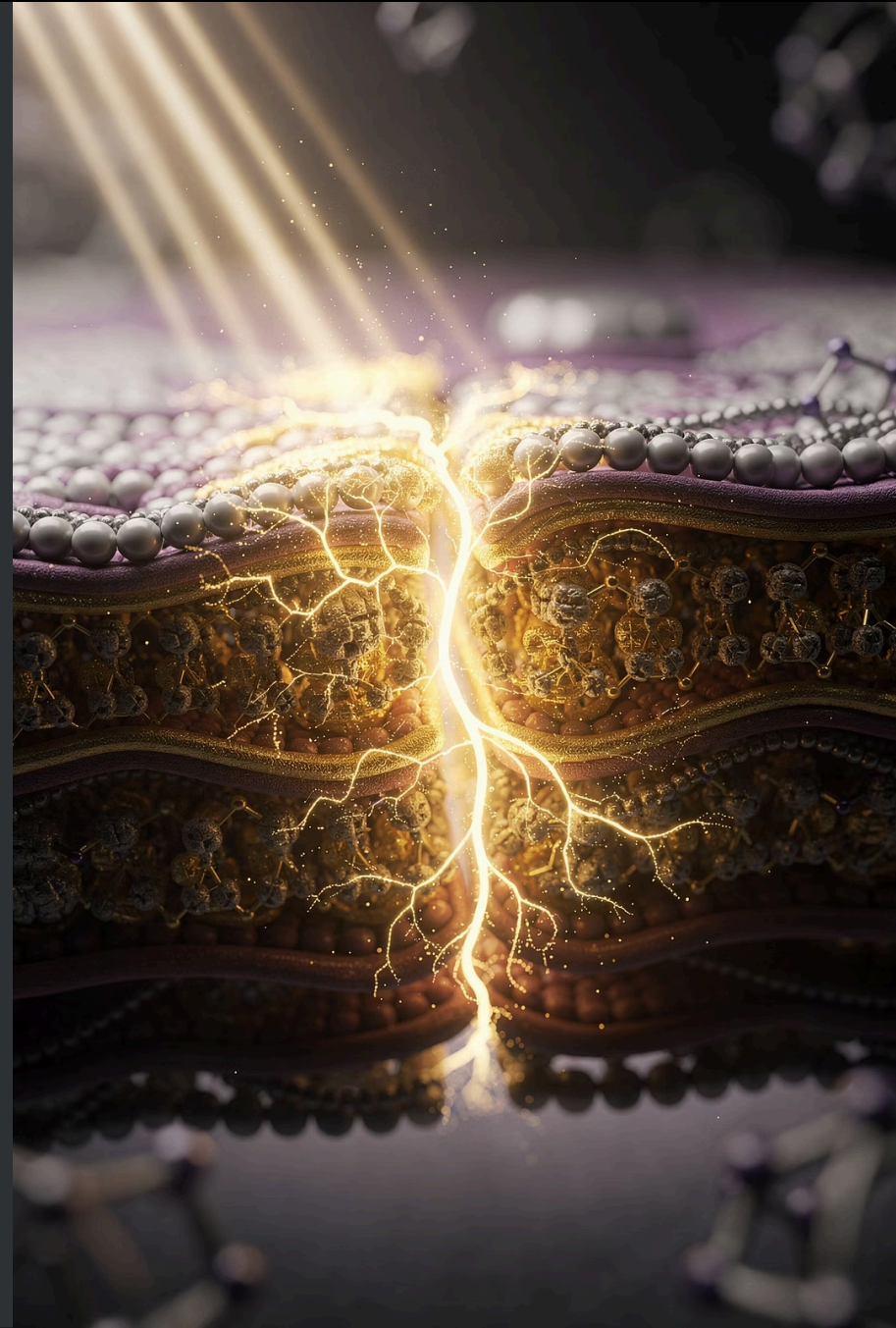
Temel amaç: Güneş ışığından gelen enerjiyi yakalayarak, Calvin döngüsünde kullanılacak iki geçici enerji taşıyıcı molekülü üretmek:

ATP

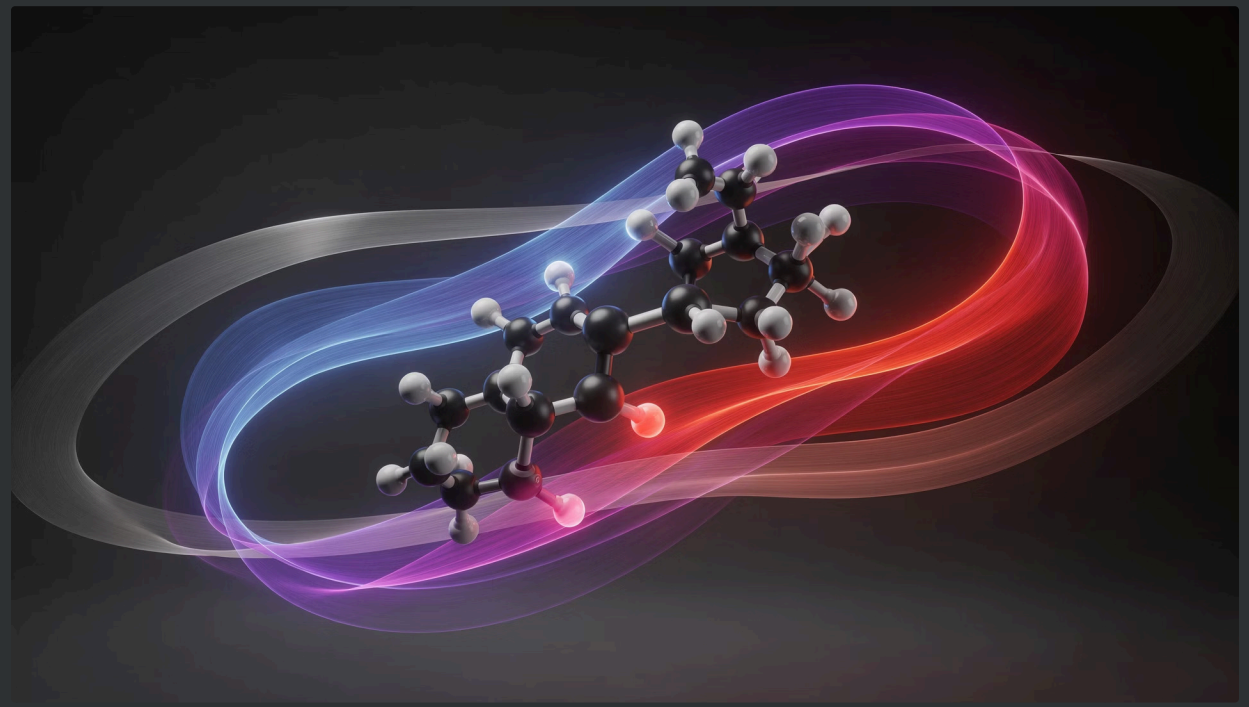
Enerji para birimi

NADPH

Yüksek enerjili elektron taşıyıcısı (indirgeyici güç)



Işığın Soğurulması



Foton adı verilen ışık enerjisi paketleri, tilakoid zarlara gömülü **klorofil a** ve **klorofil b** pigment molekülleri tarafından soğurulur.

- Mavi-mor ve kırmızı dalga boyları güçlü biçimde soğurulur
- Yeşil dalga boyu yansıtılır ya da geçirilir — bu yüzden yapraklar yeşil görünür
- **Karotenoidler** ise farklı dalga boylarını soğurarak ışık hasat aralığını genişletir ve klorofili aşırı ışıktan korur

> **Tefekkür:** Soğurulan fotonların enerjisi, bir elektronu tam olarak gereken enerji seviyesine "uyarmak" için yeterli miktardadır. Daha az enerjili fotonlar yetersiz kalır; UV gibi yüksek enerjililer moleküler yapılara zarar verir. Bu, bir kuantum ayarıdır.

Fotosistemler

Pigment molekülleri, proteinlerle birlikte **fotosistem** adı verilen büyük kompleksler halinde organize edilmiştir.

Anten Kompleksi

Yüzlerce pigment molekülünden oluşur; fotonları yakalar

Reaksiyon Merkezi

Yakalanan enerji buraya aktarılır

Anten kompleksindeki bir pigmente çarpan fotonun enerjisi, rezonans yoluyla bir pigmentten diğerine saniyenin trilyonda biri gibi akıl almaz bir hızda ve neredeyse hiç kayıp olmadan aktarılır.

Fotosistem II: Su'nun Parçalanması ve Oksijen

Reaksiyon merkezine ulaşan enerji, bir elektronu yüksek enerji seviyesine "uyarır" ve bu elektron birincil alıcı tarafından yakalanır.

Kaybedilen elektronun yeri, **su molekülünün parçalanmasıyla (fotoliz)** doldurulur:

1

Elektron

2 elektron açığa çıkar

2

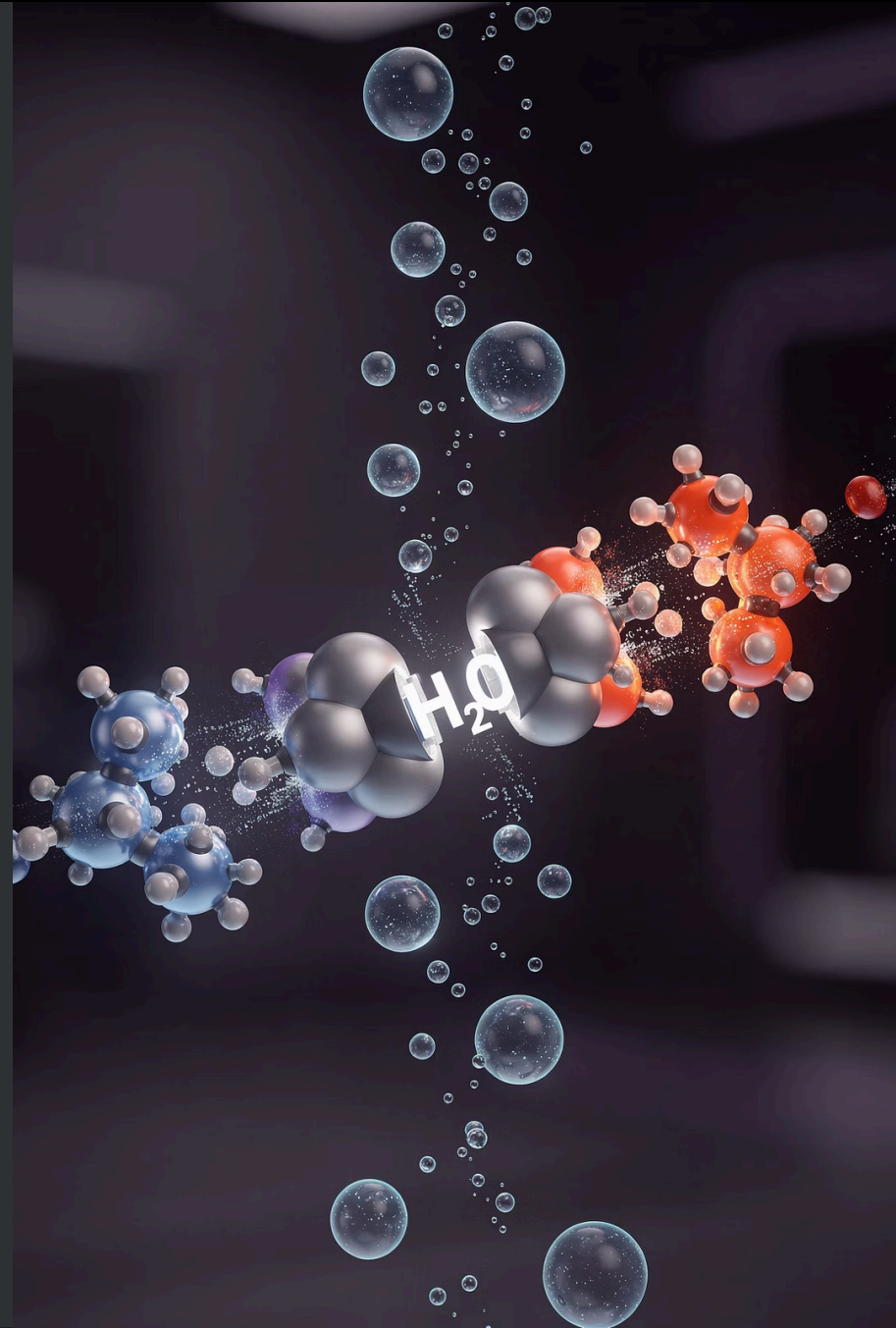
Proton

2 proton (H+) açığa çıkar

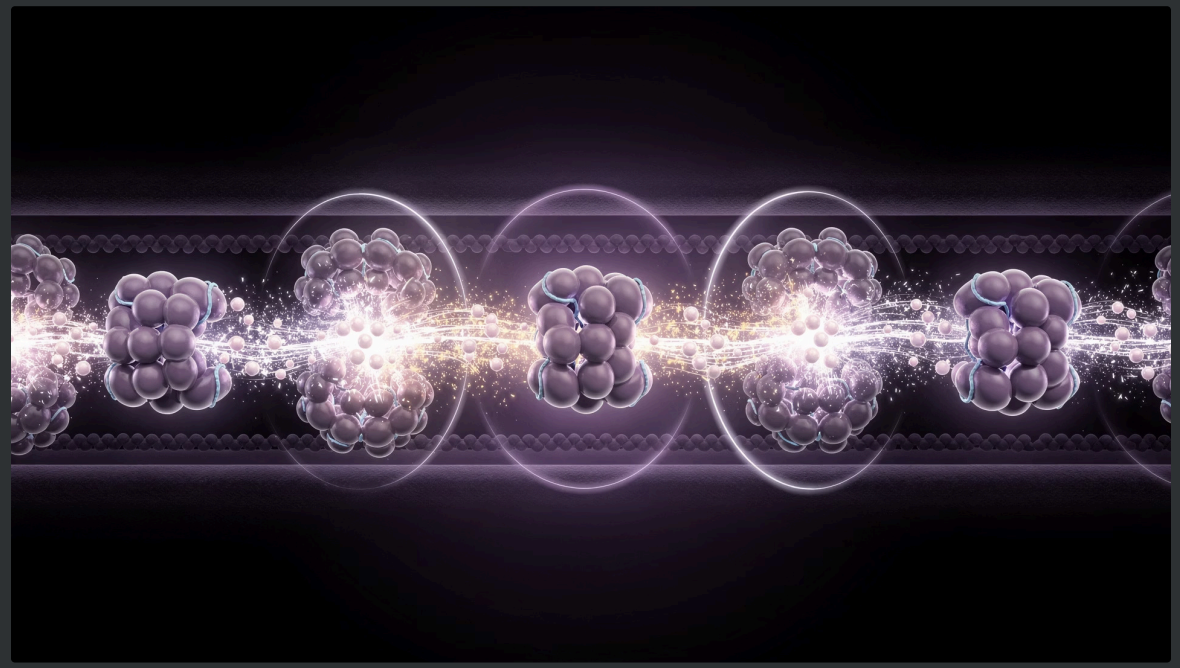
3

Oksijen

$\frac{1}{2}O_2$ açığa çıkar — soluduğumuz oksijenin kaynağı budur



Elektron Taşıma Zinciri

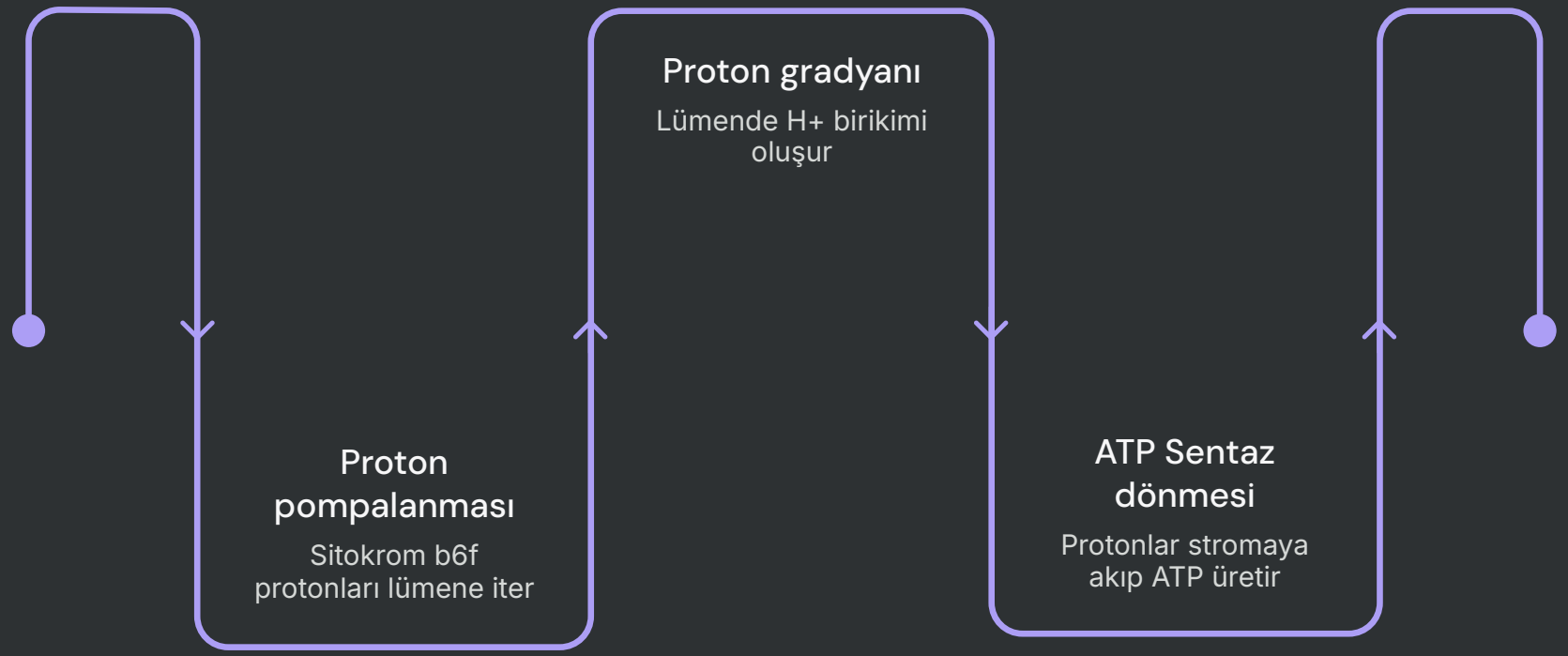


PSII'den gelen yüksek enerjili elektron, bir **Elektron Taşıma Zinciri (ETC)** boyunca plastokinon, sitokrom kompleksi ve plastosiyanin üzerinden PSI'a doğru akar.

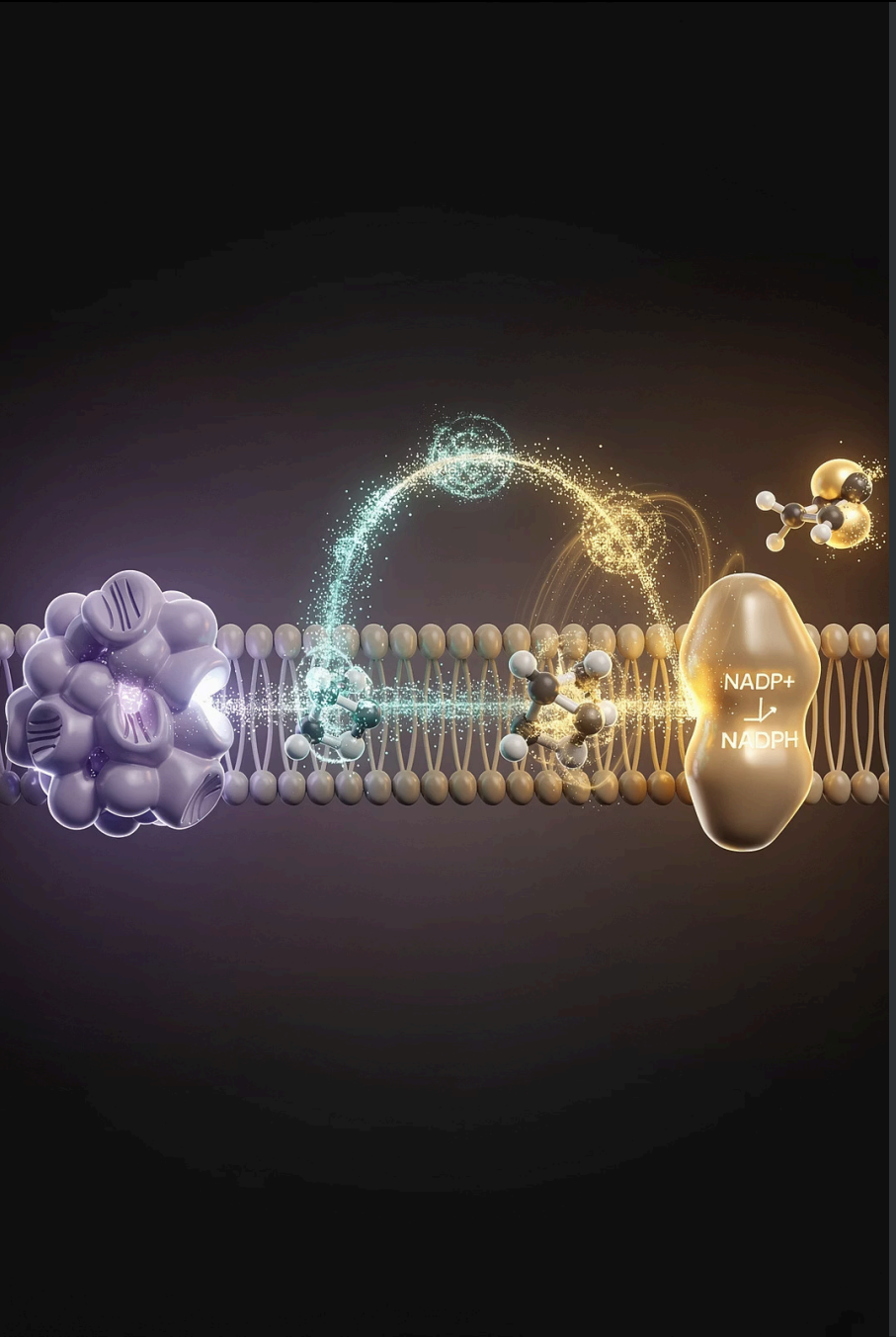
Bu zincirdeki taşıyıcıların redoks potansiyeli, elektronların termodinamik olarak belirli bir yönde — adeta bir enerji merdiveninden iner gibi — akmasını sağlayacak şekilde hassas bir sıra ile dizilmiştir.

Bu kademeli enerji salınımı, enerjinin bir anda ısı olarak ziyan olmasını önler ve proton pompalanması için kontrollü biçimde kullanılmasını mümkün kılar.

Kemiozmoz ve ATP Sentezi



ETC boyunca akan elektronlardan açığa çıkan enerji, **sitokrom b6f kompleksi** tarafından protonları stromadan tilakoid lümene aktif olarak pompalamak için kullanılır. Suyun parçalanmasıyla lümende biriken protonlarla birlikte bir **proton itici güç** oluşur. Bu protonlar, **ATP Sentaz** adlı protein kompleksinden geçerek stromaya geri akar — tıpkı bir hidroelektrik santralinde türbini döndüren su akışı gibi — ve bu mekanik dönme hareketi **ATP** sentezlenmesini sağlar.



NADPH Üretimi

ETC'nin sonunda PSI'a ulaşan elektron, burada tekrar ışık enerjisiyle uyarılır ve çok yüksek bir enerji seviyesine çıkarılır.

Ferredoksin'e Aktarım

Bu yüksek enerjili elektron ferredoksin (Fd) proteinine aktarılır

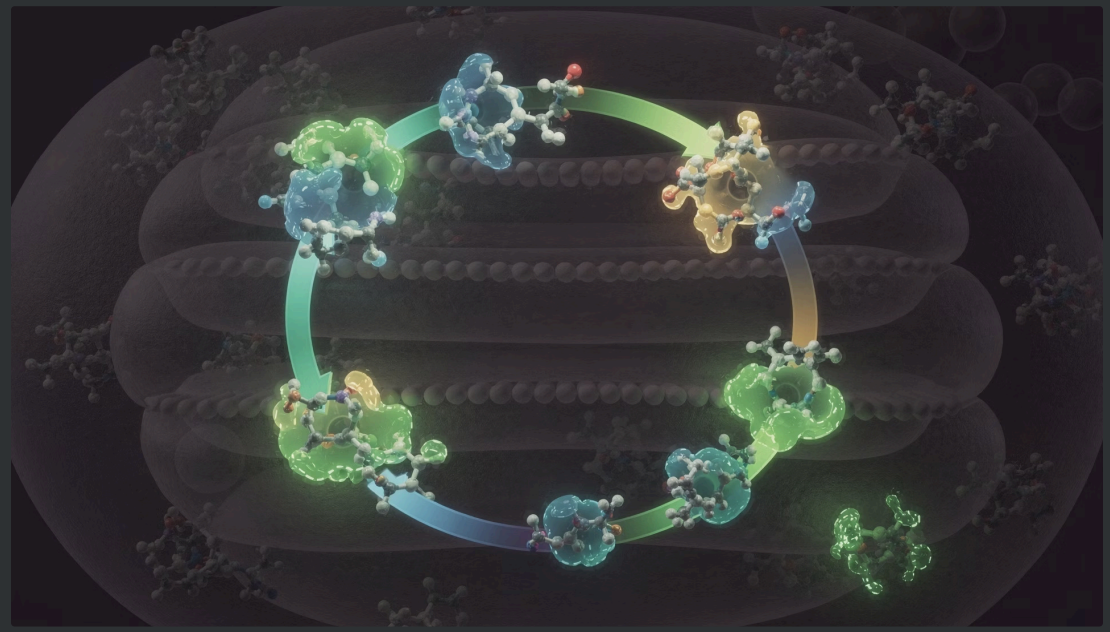
İndirgeme Reaksiyonu

NADP+ redüktaz enzimi, ferredoksinden gelen iki elektronu ve stromadan gelen bir protonu kullanarak NADP+'yi indirger

NADPH Üretimi

Sonuç: Yüksek enerjili elektron taşıyıcısı **NADPH** üretilir

Calvin Döngüsü: Genel Çerçeve



Fotosentezin ikinci aşaması olan **Calvin döngüsü**, kloroplastın stromasında gerçekleşir.

Işık Gerektirmez

Doğrudan ışık enerjisi gerektirmez

ATP ve NADPH'ye Bağımlı

Ancak ışığa bağımlı reaksiyonlarda üretilen **ATP ve NADPH'ye** tamamen bağımlıdır

Karbon Fiksasyonu

Atmosferik CO_2'nin organik moleküllere dönüştürüldüğü **"karbon fiksasyonu"** sürecidir

Calvin Döngüsü — Aşama 1: Karbon Fiksasyonu

Döngü, atmosferden alınan bir CO_2 molekülünün **RuBisCO** enzimi tarafından beş karbonlu şeker **ribuloz-1,5-bisfosfat (RuBP)**'a bağlanmasıyla başlar.

RuBisCO

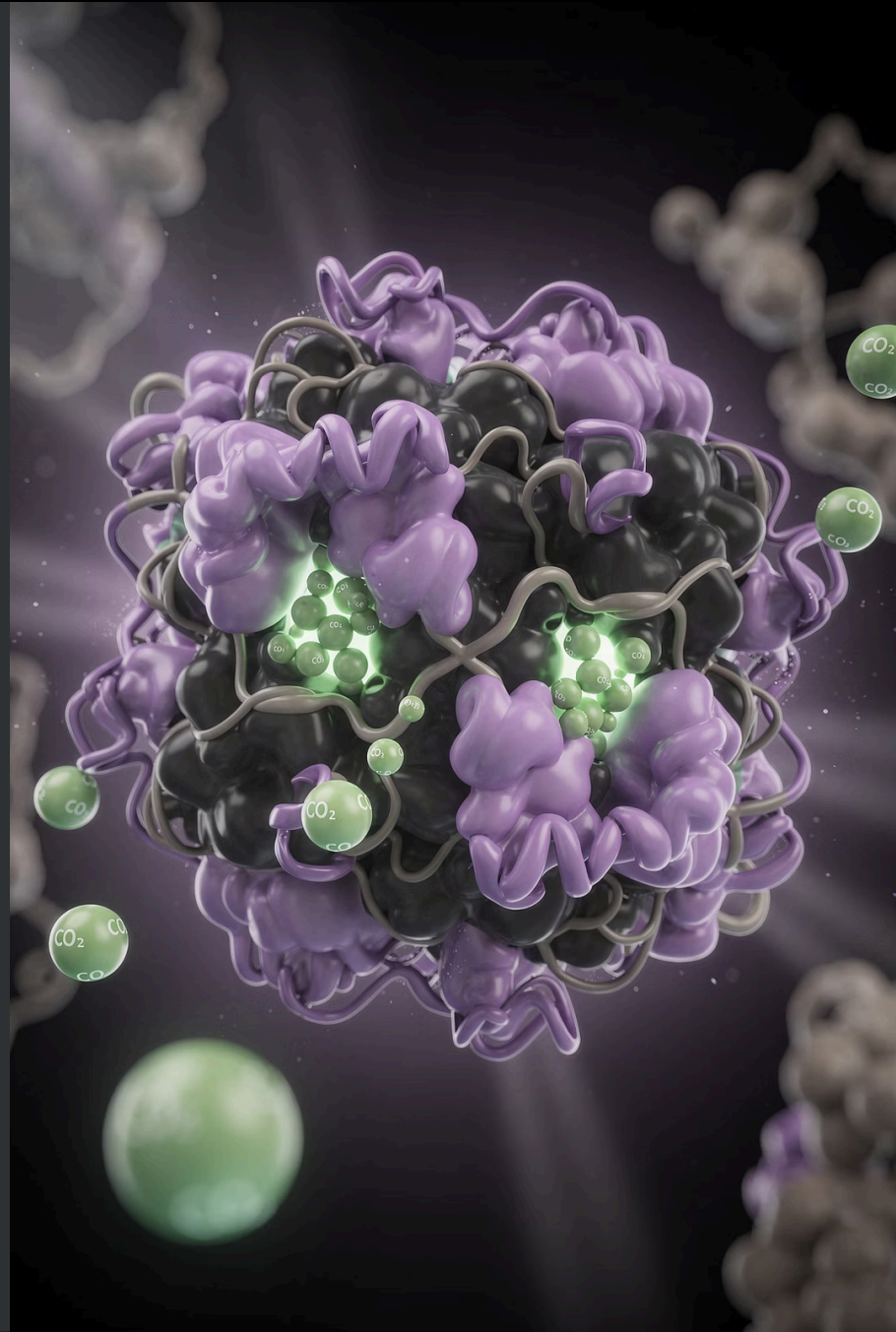
Yeryüzündeki en bol protein olduğu düşünülen enzimdir

Kararsız Ara Ürün

Oluşan son derece kararsız altı karbonlu ara ürün anında parçalanır

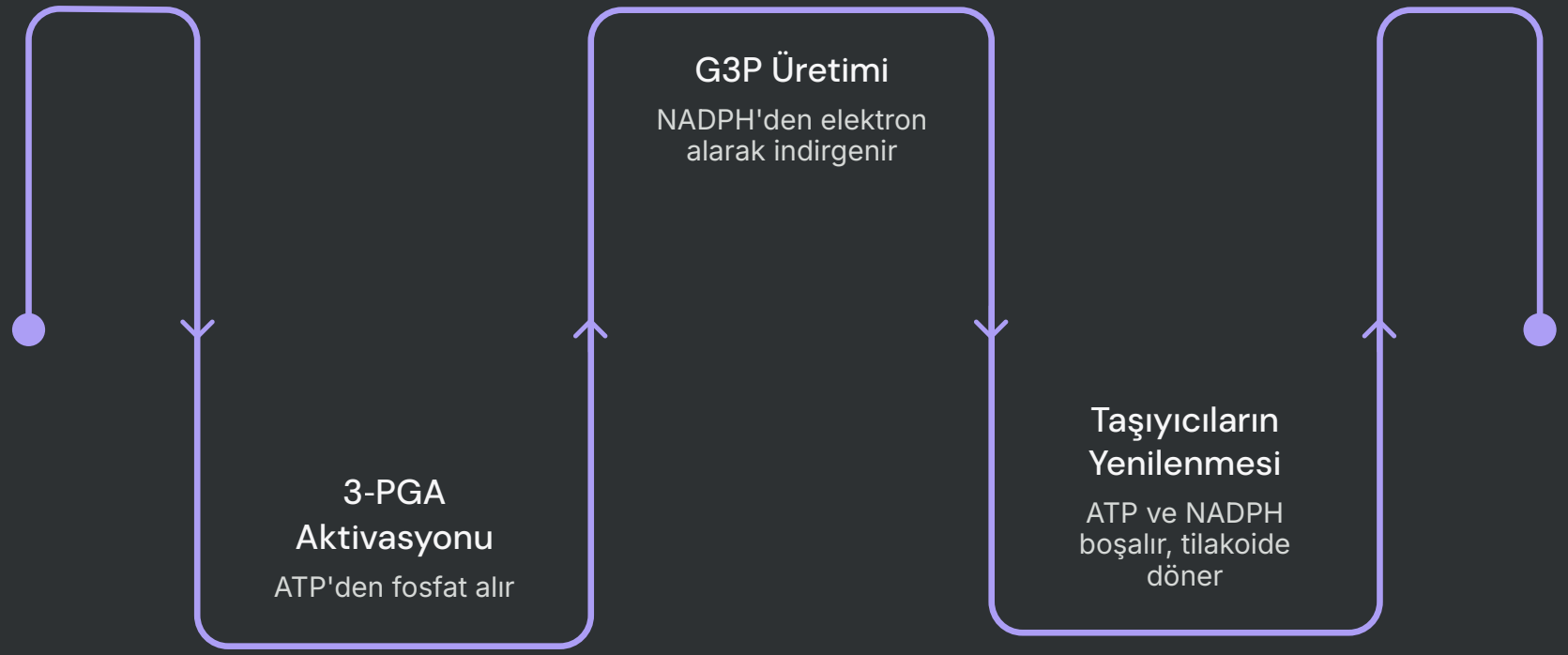
Sonuç

İki molekül üç karbonlu **3-fosfogliserat (3-PGA)** oluşur



Calvin Döngüsü — Aşama 2: İndirgenme

Bu aşamada ışık reaksiyonlarından gelen enerji kullanılır:



Bu süreçte ATP → ADP'ye, NADPH → NADP+'ye dönüşür. Bu "boşalmış" taşıyıcılar tilakoid zarlara dönerek ışık reaksiyonlarında yeniden "şarj edilmek" üzere hazır hale gelir.

Calvin Döngüsü — Aşama 3: RuBP'nin Rejenerasyonu

Döngünün her üç turunda altı molekül G3P üretilir:

Net Kazanç: 1 G3P

Yalnızca **bir** G3P döngüden net kazanç olarak ayrılır — glikoz, nişasta, selüloz veya diğer bileşiklerin sentezi için kullanılır

Rejenerasyon: 5 G3P

Geriye kalan **beş** G3P, ek üç ATP harcanmasıyla başlangıç molekülü olan üç **RuBP**'nin yeniden üretilmesinde kullanılır

Bu durum, fabrikanın ürettiği malın bir kısmını üretimin devamlılığı için tekrar sermaye olarak kullanmasına benzer.

Tam Bir Glikoz İçin

6	18	12
CO_2 Fiksasyonu	ATP Kullanımı	NADPH Kullanımı
Döngünün altı kez dönmesi gerekir	Toplam ATP harcanır	Toplam NADPH harcanır

Bir glikoz molekülü ($C_6H_{12}O_6$) üretmek için döngünün **altı kez** dönmesi gerekir.

Calvin döngüsü, sabitlenen her CO_2 için tam olarak **3 ATP ve 2 NADPH** gerektirir. Işık reaksiyonlarındaki standart elektron akışı bu oranı tam olarak karşılamaz; bu dengeyi sağlamak için **döngüsel elektron akışı** gibi ek bir mekanizma da devrededir.

Hammadde ile Sanat Eseri Arasındaki Fark

Sürecin temel girdileri ile çıktısı karşılaştırıldığında muazzam bir niteliksel sıçrama gözlemlenir:

CO_2

İnorganik, doğrusal, düşük enerjili, yaşamın atığı

Oluşum entalpisi: -393.5 kJ/mol

H_2O

İnorganik, polar çözücü, yaşamın ortamı

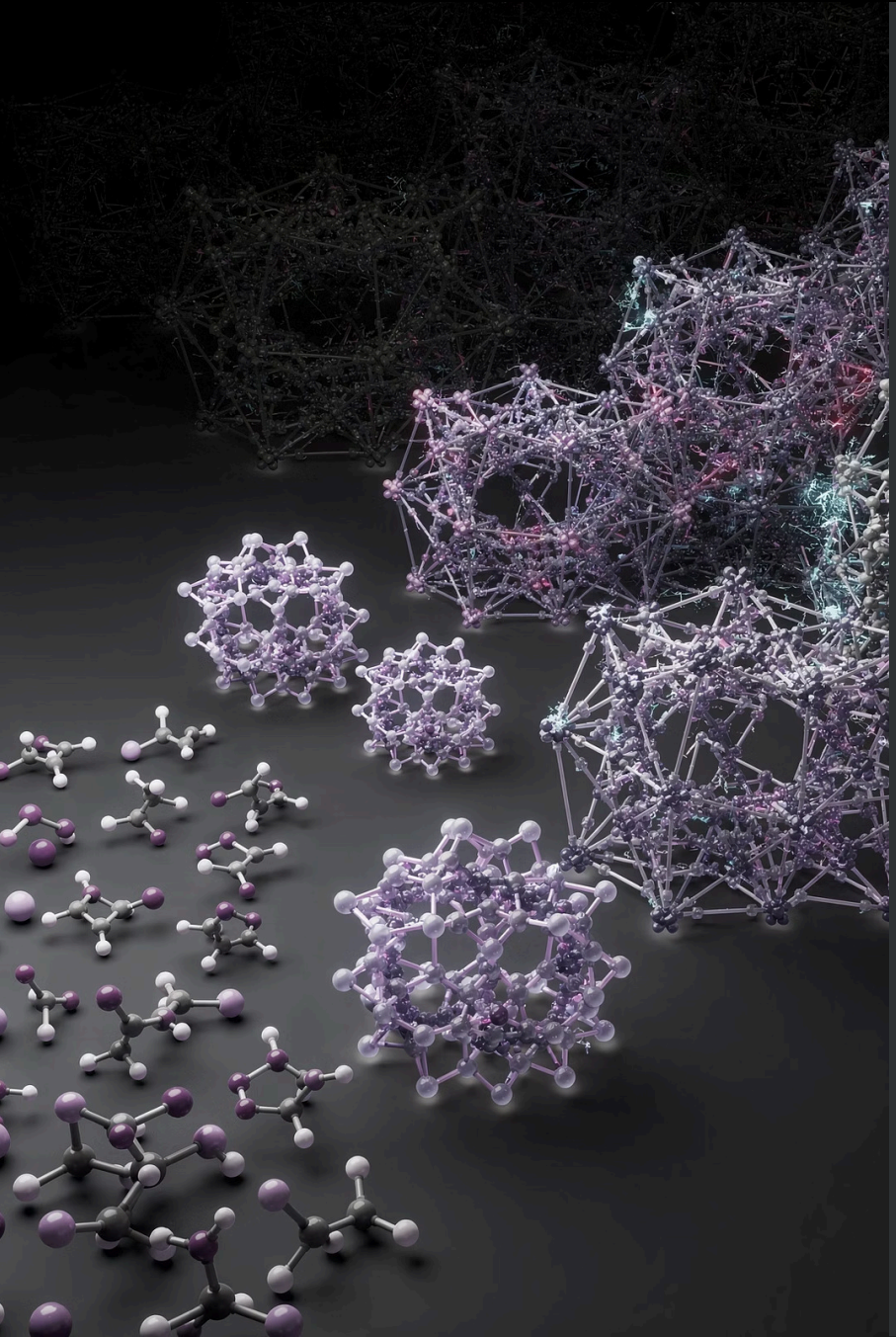
Oluşum entalpisi: -285.8 kJ/mol

Glikoz

Organik, halkasal, yüksek enerjili, yaşamın yakıtı

Oluşum entalpisi: -1271 kJ/mol

Basit, kararlı ve düşük enerjili hammaddelerden çok daha karmaşık, daha az kararlı ve kimyasal bağlarında önemli miktarda enerji depolayan bir ürün inşa edilmektedir.



Yeni Özelliklerin Kaynağı

Hammaddede bulunmayan "depolanmış kimyasal enerji", "canlılık için yakıt olma potansiyeli" ve "nişasta, selüloz gibi devasa polimerleri oluşturma kabiliyeti" gibi özellikler, glikoza nereden gelmiştir?

Bu özellikler, karbon, hidrojen ve oksijen atomlarının kendilerinde mevcut değildir. Bu atomların belirli bir plan ve nizam dahilinde bir araya getirilmesiyle, parçaların toplamından çok daha fazla ve farklı olan yeni, bütünsel özellikler ortaya çıkmıştır.

> **Tefekkür:** Bir binanın tuğlaları ve çimentosu, bir mimarın planı olmadan bir gökdelen oluşturamaz. Kloroplast içindeki atomlar ve moleküller, fotosentez gibi karmaşık bir süreci yürütecek yapıları hangi plana göre oluşturmuştur?

Hassas Ayarlar Sanatı

Sürecin her aşamasında belirli fiziksel ve kimyasal parametreler son derece hassas biçimde ayarlanmıştır:

Kuantum Ayarı

Klorofil, güneş spektrumunun tamamını değil yalnızca belirli enerji seviyelerine karşılık gelen dalga boylarını soğuracak şekilde tertip edilmiştir

Termodinamik Ayar

ETC'deki her molekülün redoks potansiyeli, elektronların kontrollü bir enerji şelalesinden akmasını sağlayacak şekilde hassas sıra ile dizilmiştir

Stokiyometrik Ayar

Calvin döngüsünün enerji ihtiyacı, döngüsel elektron akışı gibi ek mekanizmalarla anlık olarak karşılanacak şekilde düzenlenmiştir

⚠ Herhangi birindeki küçük bir sapma, tüm fabrikanın durmasına neden olabilirdi.

Kanun mu, Fail mi?

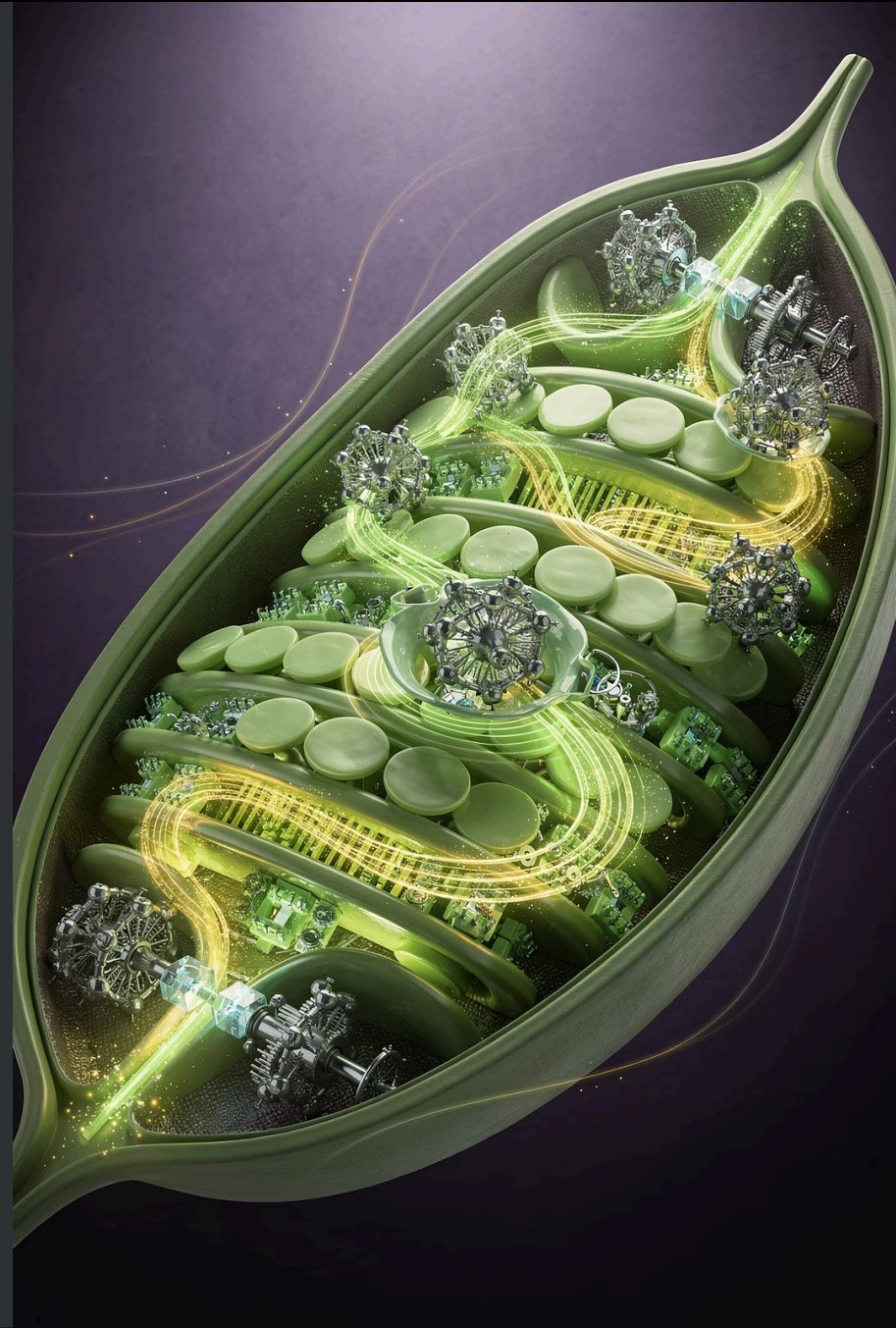
"Termodinamik kanunları ATP sentezini zorunlu kılar" gibi ifadeler dikkatli bir incelemeyi hak eder.

Fizik ve kimya kanunları, bir işin hangi kurallar çerçevesinde yapıldığını tarif eden birer "işleyiş prensibi"dir — fakat kılavuzun kendisi işi yapan fail değildir. Bir şiirin dil bilgisi kurallarına uyması, o şiiri dil bilgisi kurallarının "yazdığı" anlamına gelmez.

> Benzer şekilde, fotosentez sürecinin bu kanunlara uyması; bu kanunların fotosentezi "tasarladığı" anlamına gelmez. Kanunu koyan ile kanuna göre işleyen süreç birbirinden farklı şeylerdir.

Sonuç: Nizam, Ölçü ve Sanat

Fotosentez; ışık enerjisinin yakalanmasından karbonun sabitlenmesine kadar her aşamasında, birbiriyle mükemmel uyum içinde çalışan moleküler makineler, hassas ayarlanmış kimyasal yollar ve kusursuz bir yapı-işlev bütünlüğü sergileyen bir bütündür.

- Işığın belirli dalga boylarının seçilerek soğurulması
- Elektronların hassas dizilmiş bir zincir boyunca kontrollü aktarılması
- Soyut bir proton gradyanının somut bir ATP paketine dönüştürülmesi
- Tüm bu süreçlerin anlık hücresel ihtiyaçlara göre dinamik olarak düzenlenmesi

Su ve CO_2'nin basitliği ile onlardan inşa edilen glikozun karmaşıklığı arasındaki fark, parçalarda bulunmayan özelliklerin sanatlı bir tertiple nasıl ortaya çıktığının açık bir delilidir.